

# 表面微細周期構造形成による放射線検出用蛍光体の高性能化

## Study on fabrication of scintillation detectors with periodic microstructures

研究代表者 群馬大学 大学院理工学府 准教授 三浦 健太

Kenta Miura

The first demonstration of integrating a simple one-dimensional (1-D) periodic microstructure and a light-emitting zinc oxide (ZnO) thin film on a silicon substrate using a simple process with two-beam interference lithography and sputtering was presented. A 1-D microstructure composed of ZnO was obtained using our fabrication process without using a photomask and dry etching. The intensity of a photoluminescence peak observed from a sample with the periodic microstructure was approximately 5.3 times stronger than that without it. The light-extraction efficiency from the ZnO thin film seems to be improved by the integration of the 1-D periodic microstructure. Such techniques are also expected to be applied to improve performance of medical diagnosis systems using scintillators such as positron emission tomography (PET).

### 要旨

医療分野で癌の診断などに用いられる PET (Positron Emission Tomography: 陽電子放射断層撮像法)の研究開発においては,次世代型のTOF(Time of Flight)-PETが注目されており,TOF-PET用シンチレータ(放射線照射により蛍光を発する物質)として,LSO( $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ )結晶が多く用いられている.本研究では,簡便かつ高スループットが期待できる,二光束干渉露光法を含んだ独自の作製プロセスを用い,ミクロンオーダーの周期を持つ微細周期構造をLSOシンチレータ結晶の表面に形成することで,放射線照射時に発生する蛍光のLSO結晶内部での全反射の抑制を試みる.これにより,シンチレーション検出器の光センサーへの蛍光の到達光量や到達時間の改善が見込まれ,LSO結晶を用いたシンチレーション検出器の時間分解能の向上が期待できることから,放射線医学における画像診断技術の発展への貢献および大きな社会的波及効果が期待できる.

### 1. まえがき

医療分野で癌の診断などに用いられる PET (Positron Emission Tomography: 陽電子放射断層撮像法, 図1)<sup>(1)</sup>の研究開発においては,次世代型としてTOF(Time of Flight)-PETが盛んに研究されており,TOF-PET用シンチレータ(放射線照射により蛍光を発する物質)として,LSO( $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ )結晶が多く用いられている<sup>(2)</sup>.LSOは,他のシンチレータ結晶に比べ,蛍光出力が高い上に蛍光減衰時間が短い(約40ns)など,TOF-PETの時間分解能を向上させる上で多くの優位性を持つ.しかしながら,LSO

は,他のシンチレータと同様,屈折率が高く(PETで利用する $\gamma$ 線の照射時の発光波長420nmに対し,屈折率1.82),光センサー受光部のガラス窓(屈折率1.5程度)や接着剤(屈折率1.4程度)との大きな屈折率差により,LSO結晶内部からの発光の一部が境界面で全反射してしまい,光センサーに到達する蛍光の光量低下や到達時間の遅れが生じる.これがTOF-PETの更なる性能向上の妨げとなっている.

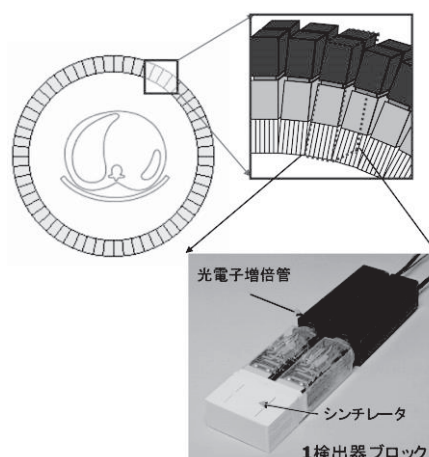


図1. PET装置の概略図と $\gamma$ 線検出器の写真(一例)<sup>(1)</sup>.

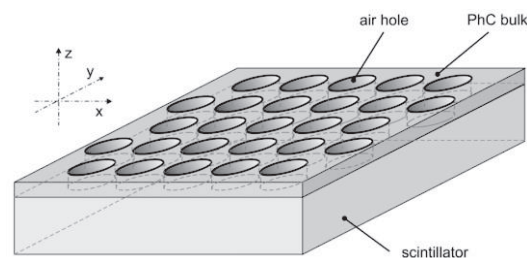


図2. 先行研究の例(シンチレータ上の円孔型二次元微細周期構造)<sup>(3)</sup>.

この問題を解決する手段として,Lecoqらは,シンチレータ表面に図2のような円孔型二次元微細周

期構造を形成し、境界面での全反射を抑制する提案をしているが<sup>(3)</sup>、このタイプの構造は、高度な微細加工技術（電子ビーム露光およびプラズマエッチング）を用いてパターンングされるため、生産性（スループット）の面で大きな課題がある。

そこで本研究では、簡便かつ高スループットが期待できる、二光束干渉露光法を含んだ独自の作製プロセスを用い、ミクロンオーダーの周期を持つ微細周期構造をLSOシンチレータ表面に形成することによる全反射の抑制を検討した。これにより、シンチレーション検出器の光センサーへの蛍光の到達光量や到達時間の改善が期待でき、LSO結晶を用いたシンチレーション検出器の時間分解能の向上につながると考えられる。

## 2. 実験内容および結果

近年、微細周期構造を発光ダイオード(LED)に導入して光取り出し効率を向上させる試みがなされている<sup>(4)</sup>。一般に、LEDを構成する半導体材料の屈折率は高いため、LEDからの発光は、空気との境界で全反射される成分が存在し、これが観測される発光強度の低下につながる。ところが、境界に微細周期構造を付与すると、全反射される成分の一部が回折波として透過するようになり（全反射の抑制効果）、光取り出し効率を改善できる（図3参照）<sup>(5)</sup>。

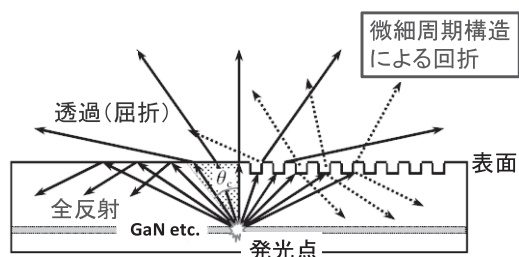


図3. LEDからの光取り出しの概念図<sup>(5)</sup>。

この効果を利用して、研究代表者は、LSOに見立てた発光材料としての酸化亜鉛(ZnO)薄膜（膜厚約1μm）をSi基板上にスパッタリング法で成膜し、更なるその試料の表面に、簡便な二光束干渉露光法およびリフトオフ法を組み合わせた独自のプロセス（プラズマエッチング無し）により、ZnOスパッタ膜からなる一次元微細周期構造（周期：約1.4μm、深さ：約0.25μm）を形成することに成功した（図4）<sup>(1)</sup>。

二光束干渉露光法を用いた微細周期構造作製プロセスにおいて、従来、リフトオフ法の適用は難しいとされていたが、研究代表者は、フォトリソの厚さや露光条件（露光強度および露光時間）、ZnOスパッタ膜の膜厚などを最適化することで、これを実現した。このようなプロセスで微細周期構造を作製した例は、研究代表者が知る限りでは世界的に見ても初めてである。図4の微細周期構造は、表面に粗さが見られるが、この粗さが、表面での回折だけでなく光散乱の効果も生じさせ、より一層の全反射抑制効果が得られる。

この微細周期構造の効果を確認するため、作製した試料のフォトルミネッセンス(PL)スペクトルを、励起光源としてHe-Cdレーザー（波長325nm）を用いて測定したところ、微細周期構造の有無にかかわらず波長390~400nm付近に発光ピークが観測され、微細周期構造が有る場合は、無い場合に比べ、観測される発光ピーク強度が約5.3倍にまで向上することを確認できた（図5）<sup>(1)</sup>。

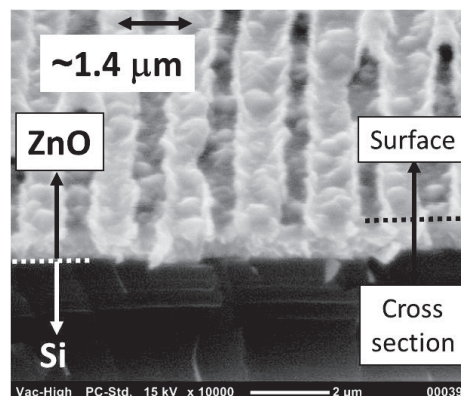


図4. 作製した一次元微細周期構造の走査型電子顕微鏡像<sup>(1)</sup>。

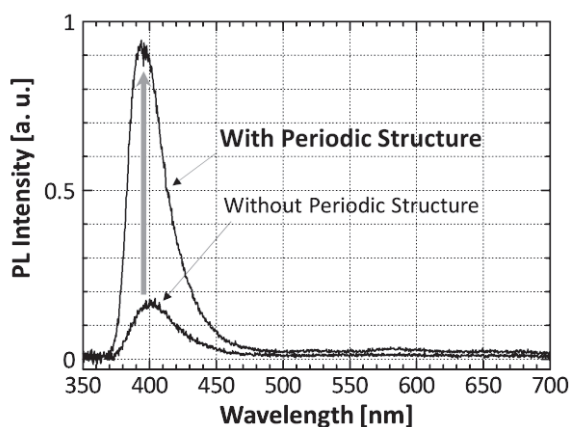
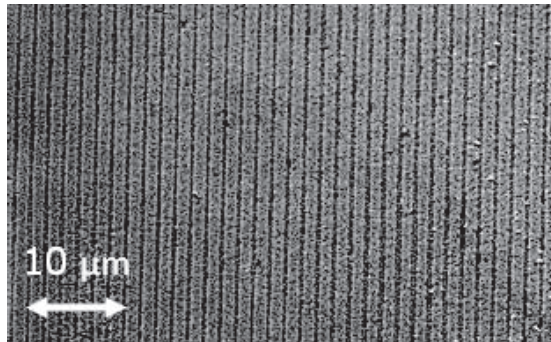
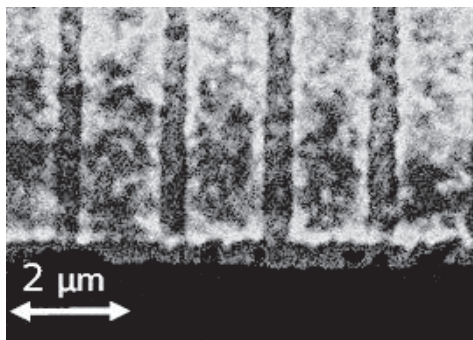


図5. PLスペクトルの測定結果<sup>(1)</sup>。

更に、同様のプロセスにて、深さを  $0.10\ \mu\text{m}$  に設定した一次元微細周期構造も作製した<sup>[2]</sup>。図 6 にその走査型電子顕微鏡(SEM)像を示す。広範囲にわたり、微細周期構造を形成できていることがわかる。作製した試料の PL スペクトルの測定結果を図 7 に示す。波長  $420\text{nm}$  付近の発光ピーク強度が、当該微細周期構造の効果により、約 1.7 倍に向上することを確認できた。



(a)



(b)

図 6. 作製した微細周期構造の(a)表面および(b)鳥瞰 SEM 像<sup>[2]</sup>。

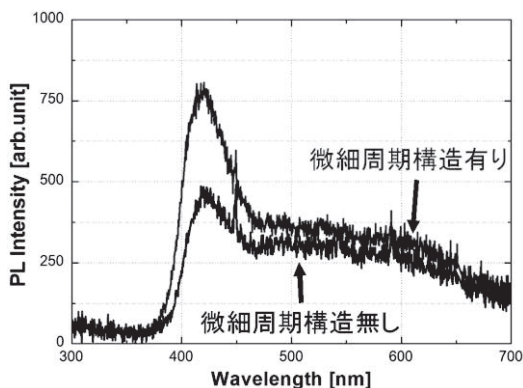


図 7. PL スペクトルの測定結果<sup>[2]</sup>。

図 8 には、深さを約  $0.35\ \mu\text{m}$  に設定して作製した一次元微細周期構造の表面の SEM 像を示す。この深さにおいても、問題なく微細周期構造を形成できる

ことが確認された。図 9 は、この試料の PL スペクトルの測定結果である。波長  $390\sim 400\text{nm}$  付近に発光ピークが観測され、微細周期構造が有る場合は、無い場合に比べ、観測されるピーク強度が約 6.0 倍にまで向上した。

以上の結果から、当該微細周期構造の凹凸の深さが、光取り出し効率に大きく影響することが確認され、現時点では、その深さを約  $0.35\ \mu\text{m}$  に設定した場合が目的に適していることがわかった。

このような微細周期構造は、LSO シンチレータ結晶の表面にも形成が可能であり、同様の光取り出し効率改善の効果(全反射抑制効果)が期待できる。これによって、LSO シンチレーション検出器の光センサーへの蛍光の到達光量や到達時間が改善され、検出器としての時間分解能が向上すれば、TOF-PET の診断画像の画質の向上につながり、薬剤投与量の削減(被ばくの低減)や検査時間の短縮および感度、特異度の向上が見込まれることから、放射線医学における画像診断技術の発展への貢献が大いに期待でき、大きな社会的波及効果が見込まれる。

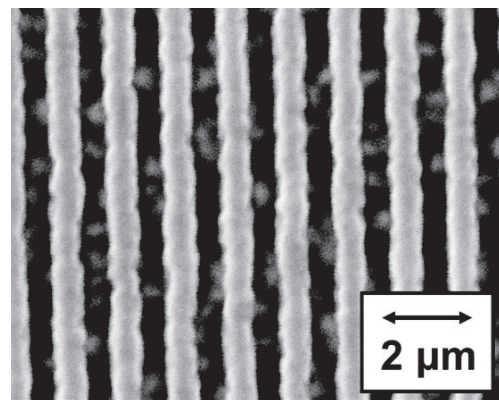


図 8. 作製した微細周期構造の表面の SEM 像<sup>[3]</sup>。

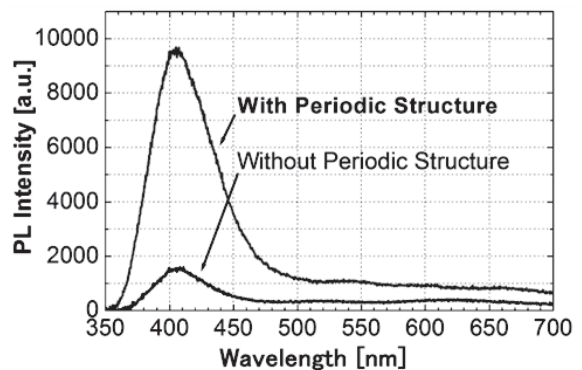


図 9. PL スペクトルの測定結果<sup>[3]</sup>。

### 3. 関連する研究成果

#### 3.1 Zn過剰ZnO薄膜の試作および評価<sup>[4]</sup>

ZnO は、ワイドバンドギャップ(3.37eV)を持つ酸化半導体であり、近年は、その広いバンドギャップを利用した透明導電体としての応用が検討されている<sup>[6]</sup>。一方で、発光材料としてもよく知られており、主にバンドギャップによる紫外発光(波長 380nm 付近)と、酸素欠陥等による緑色発光(波長 550nm 付近)を得られることがわかっている<sup>[6]</sup>。今回、Zn と ZnO の共スパッタにより Zn 過剰 ZnO (ZnO:Zn) 薄膜を作製したところ、顕著な赤色発光帯を観測した。

まず、高周波(RF)マグネトロンスパッタリング法を用いて ZnO:Zn 薄膜の成膜を行った。基板には溶融石英を用い、スパッタリングガスとして Ar を 26 sccm, H<sub>2</sub> を 4 sccm の流量で真空チャンバ内に導入した。RF 電力は 75W に設定し、膜厚が 1 μm になるようにスパッタリング時間を設定した。成膜の際、図 10 のように ZnO ターゲット(直径 100mm, 純度 99.99%) 上に複数の Zn ワイヤー(1mm 径, 純度 99.99%) を対称に置き、共スパッタリングにより Zn の添加を行った。また、発光特性の比較を行うため、成膜時に使用する Zn ワイヤーの量(一本あたりの長さおよび本数)を変えた試料を複数準備した。

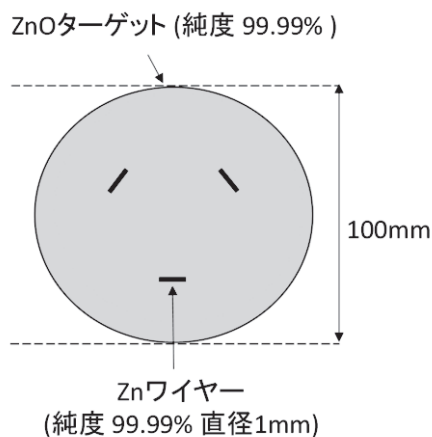


図 10. ZnO:Zn 成膜時のターゲットの概略図。

次に、成膜した ZnO:Zn 薄膜のアニール処理を行った。電気炉を用いて 1 時間ごとに 100°C ずつ 450°C まで昇温し、6 時間保持後、自然冷却した。その後、試料の PL 特性の評価を行った。励起光源には He-Cd レーザー(波長 325nm)を使用した。

試料の PL スペクトルの測定結果を図 11 に示す。

Zn を過剰に添加することによって、波長 650~700nm 付近の赤色波長帯に発光ピークを確認できた。更に、使用した Zn ワイヤーが 10mm×3 本の試料においては、赤色波長帯の発光ピークに加え、波長 550nm 付近の緑色波長帯にも発光ピークが見られた。

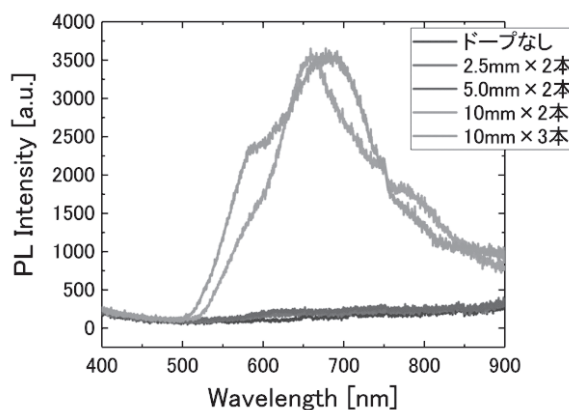


図 11. PL スペクトルの測定結果。

赤色波長帯の発光も、緑色の発光帯と同様、酸素欠陥によるものと考えられ<sup>[7]</sup>、引き続き詳細な検討が必要であるが、今回の結果から、ZnO:Zn 薄膜の Zn 添加量を変えることによって、発光帯を緑色もしくは赤色に制御できる可能性が示された。波長 650~700nm の発光ピークは、いわゆる「生体の窓」の範囲内であり、ZnO は生体親和性の高い材料としてもよく知られていることから、生体埋め込み型の放射線検出用蛍光体としての応用を検討しているところである。

#### 3.2 ZnO/Ag/ZnO透明膜の試作<sup>[5][6]</sup>

ITO をはじめとする透明導電膜は、太陽電池や液晶ディスプレイ等、幅広く利用されている。ITO は In を主成分とした酸化物であるが、In は希少かつ高価な金属であり、資源の供給の面で問題を抱えているため、ZnO などが代替材料として検討されている。ZnO を用いた透明導電膜の一例として、最近では、Ag 薄膜を ZnO で挟んだ三層膜(ZnO/Ag/ZnO)が注目されている<sup>[8]</sup>。今回、RF スパッタリング法を用いて ZnO/Ag/ZnO 透明膜の作製を試み、透過特性の評価を行った。

RF スパッタリング法を用い、溶融石英基板(11.5 mm×24.5 mm)上に ZnO/Ag/ZnO 透明膜を成膜した。今回は、ZnO 成膜時に H<sub>2</sub> を導入した ZnO/Ag/ZnO 膜と、

H<sub>2</sub>を導入しない ZnO/Ag/ZnO 膜を作製した。ZnO 層の設定膜厚は 40 nm とした。RF 電力は 75 W とし、導入ガスは、H<sub>2</sub>を導入する試料においては H<sub>2</sub>の流量を 4 sccm, Ar の流量を 26 sccm, H<sub>2</sub>を導入しない試料においては Ar の流量を 28 sccm に設定しスパッタリングを行った。Ag の設定膜厚はどちらの試料も共通で 20 nm とした。RF 電力は 30 W とし、導入ガスは、Ar の流量を 13 sccm に設定しスパッタリングを行った。作製した試料に対して、分光光度計を用いて透過スペクトルの測定を行った。

図 12 に作製した試料の外観を、図 13 に透過スペクトルの測定結果を示す。可視光域において、700 nm 以上の長波長帯では、H<sub>2</sub>を導入していない試料の方が高い透過率を示したが、700 nm 以下の短波長帯、特に 400~500 nm の波長帯においては、H<sub>2</sub>を導入した試料の方が高い透過性を示した。この波長帯はLSO の発光波長(420nm)も含んでいるため、ZnO/Ag/ZnO 透明膜を LSO の表面コーティング材として適用することを検討中である。

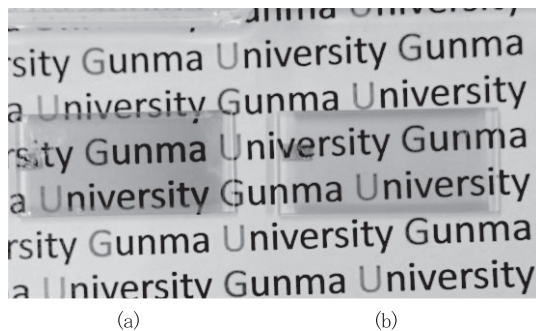


図 12. 作製した試料の外観。  
(a)H<sub>2</sub>導入なし, (b)H<sub>2</sub>導入あり。

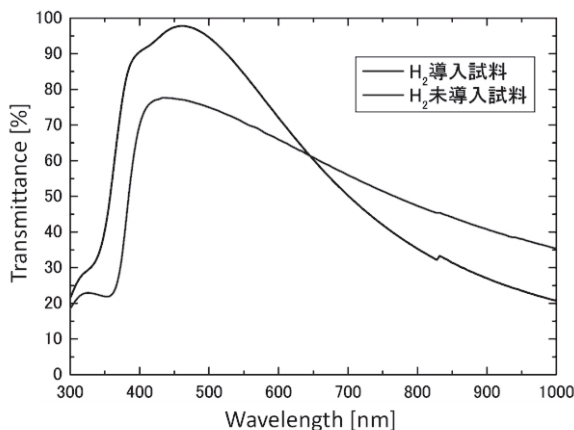


図 13. 透過スペクトルの測定結果。

## 発表論文

- [1] O. Matsumoto, K. Miura, H. Kawaguchi, M. Sano, M. Saito, Y. Hirano, W. Kada, and O. Hanaizumi, Fabrication of periodic microstructures for improving light-extraction efficiencies of light-emitting ZnO/Si devices, Results in Physics, 7 (2017) 2965-2967.
- [2] M. Saito, K. Miura, Y. Hirano, W. Kada, and O. Hanaizumi, Periodic microstructures for medical applications, 4th International Symposium of Gunma University Medical Innovation, Maebashi, Japan, Nov. 6, 2017.
- [3] O. Matsumoto, M. Saito, D. Yamazaki, K. Noguchi, and K. Miura, Periodic microstructures for Improving light-extraction efficiencies of light-emitting ZnO/Si devices, 23rd Microoptics Conference, Taipei, Taiwan, Oct. 16, 2018.
- [4] 山本峻也, 内堀智樹, 原祥大, 三浦健太, 野口克也, 加田渉, 花泉修, スパッタリング法による Zn 過剰 ZnO 薄膜の作製と発光特性の評価, 電子情報通信学会 2018 年ソサイエティ大会, 金沢, 2018 年 9 月 11 日.
- [5] S. Kotsuji, T. Uchibori, S. Yamamoto, K. Miura, K. Noguchi, W. Kada, and O. Hanaizumi, Fabrication and evaluation of transparent-conductive ZnO/Ag/ZnO multilayer thin films, 5th International Symposium of Gunma University Medical Innovation and 9th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering, Kiryu, Japan, Dec. 6, 2018.
- [6] 内堀智樹, 山本峻也, 小辻澄人, 三浦健太, 野口克也, 加田渉, 花泉修, スパッタリング法を用いて作製した ZnO/Ag/ZnO 透明導電膜の評価, 電子情報通信学会 2018 年ソサイエティ大会, 金沢, 2018 年 9 月 11 日.

## (以下, 関連論文)

- [7] W. Kada, S. Kawabata, T. Satoh, M. Sakai, R. K. Parajuli, N. Yamada, M. Koka, K. Miura, O. Hanaizumi, and T. Kamiya, Observation of changes in ion beam induced luminescence spectra from organics during focused microbeam irradiation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 404 (2017) 100-105.
- [8] W. Kada, S. Kawabata, T. Satoh, R. K. Parajuli, N. Yamada, M. Koka, K. Miura, O. Hanaizumi, and T. Kamiya, Development of a high-speed wavelength-dispersive IBIL analysis and imaging system using a multi-channel photon-counting spectrometer, Nuclear Instruments and

- Methods in Physics Research Section B, 406 (2017) 124-129.
- [9] S. Kawabata, W. Kada, Y. Matsubara, T. Satoh, M. Sakai, R. K. Parajuli, N. Yamada, M. Koka, K. Miura, O. Hanaizumi, and T. Kamiya, Micro-PIXE analysis and imaging of radio-photoluminescence glass bead microdosimeters, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 406 (2017) 139-143.
- [10] M. Kanakubo, K. Miura, K. Shimada, R. Fujii, K. Noguchi, W. Kada, and O. Hanaizumi, Photoluminescence properties of Yb and Ag co-doped Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films, Key Engineering Materials, 790 (2018) 43-47.
- [11] M. Haruyama, Y. Suda, W. Kada, S. Onoda, T. Ohshima, K. Miura, and O. Hanaizumi, Fabrication of two-dimensional arrays of fluorescent centers in single-crystalline diamond using particle beam writing, Key Engineering Materials, 790 (2018) 48-54.
- [12] W. Kada, I. Sudić, N. Skukan, S. Kawabata, T. Satoh, J. Susaki, S. Yamada, T. Sekine, R.K. Parajuli, M. Sakai, K. Miura, M. Koka, N. Yamada, T. Kamiya, M. Jakšić, and O. Hanaizumi, Evaluation of scintillation properties of  $\alpha$ - and  $\beta$ -SiAlON phosphors under focused microbeam irradiation using ion-beam-induced luminescence analysis, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, in press.
- [13] W. Kada, T. Satoh, S. Kawabata, M. Haruyama, Y. Suda, S. Miura, K. Kasuya, R. Saruya, M. Koka, N. Yamada, K. Miura, S. Onoda, H. Kraus, G. Astakhov, T. Kurobori, T. Ohshima, T. Kamiya, and O. Hanaizumi, Focused microbeam irradiation technique for the fabrication of micro-meter scale optical structures, 24th International Scientific Meeting on Vacuum Science and Technique, Zadar, Croatia, May 19, 2017 (invited).
- [14] W. Kada, S. Kawabata, T. Satoh, J. Susaki, S. Yamada, T. Sekine, R. K. Parajuli, M. Sakai, K. Miura, M. Koka, N. Yamada, T. Kamiya, and O. Hanaizumi, Evaluation of scintillator properties of  $\alpha$ - and  $\beta$ -SiAlON phosphors under focused microbeam irradiation conditions using ion beam induced luminescence (IBIL) analysis, 23rd International Conference on Ion Beam Analysis (IBA2017), Shanghai, China, October 8-13, 2017.
- [15] S. Nakatsu, W. Kada, T. Imayoshi, K. Kumagai, H. Tago, M. Koka, N. Yamada, R. Yamagata, Y. Ishii, T. Satoh, K. Miura, T. Kamiya, and O. Hanaizumi, Elemental composition characterization of air-borne particulate matters hourly collected from atmosphere by in-air micro-PIXE analysis, 5th International Symposium of Gunma University Medical Innovation and 9th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering, Kiryu, Japan, Dec. 6, 2018.
- [16] K. Iiduka, Y. Akagami, D. Hasegawa, W. Kada, M. Sakai, P.R. Kumar, M. Koka, A. Yokoyama, N. Yamada, R. Yamagata, Y. Ishii, T. Satoh, K. Miura, and O. Hanaizumi, Radio-photoluminescence and scintillation properties of phosphate glass dosimeter with activator complex of silver and europium, 5th International Symposium of Gunma University Medical Innovation and 9th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering, Kiryu, Japan, Dec. 6, 2018.
- [17] A. Yokoyama, W. Kada, M. Sakai, K. Miura, and O. Hanaizumi, Therapeutic carbon beam measurement using the G2000 glass scintillator, 5th International Symposium of Gunma University Medical Innovation and 9th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering, Kiryu, Japan, Dec. 6, 2018.
- [18] K. Ito, Y. Hashimoto, K. Miura, K. Noguchi, W. Kada, and O. Hanaizumi, Development of visible-light responsive photocatalyst using transparent Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin film, 5th International Symposium of Gunma University Medical Innovation and 9th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering, Kiryu, Japan, Dec. 6, 2018.
- [19] A. Yoshida, K. Omi, K. Miura, K. Noguchi, W. Kada, and O. Hanaizumi, Preparation of MgO thin films using RF sputtering for applications to radiation detectors, 5th International Symposium of Gunma University Medical Innovation and 9th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering, Kiryu, Japan, Dec. 6, 2018.
- [20] S. Yokosawa, K. Kasuya, Y. Wang, R. Kuribara, R. Takahashi, S. Miura, T. Higuchi, W. Kada, K. Miura, Y. Ishii, T. Sato, and O. Hanaizumi, Fabrication and evaluation of Mach-Zehnder optical waveguides in polyimide thin film utilizing proton beam writing technique, 5th International Symposium of Gunma University Medical Innovation and 9th International

- Conference on Advanced Micro-Device Engineering, Kiryu, Japan, Dec. 6, 2018.
- [21] T. Higuchi, W. Kada, Y. Suda, M. Haruyama, S. Yokosawa, S. Onoda, K. Miura, Y. Ishii, T. Ohshima, and O. Hanaizumi, Development of long-term data storage utilizing two dimensional fluorescent defect distributions created in diamond by focused particle beam writing technique, 5th International Symposium of Gunma University Medical Innovation and 9th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering, Kiryu, Japan, Dec. 6, 2018.
- [22] 加田渉, Sudić Ivan, Skukan Natko, 須崎純一, 山田鈴弥, 関根卓洋, 三浦健太, 佐藤隆博, 江夏昌志, 山田尚人, 神谷富裕, Jakšić Milko, 花泉修, 荷電粒子誘起発光分析による  $\alpha$ -および  $\beta$ -SiAlON:Eu シンチレータの評価, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 東京, 2018 年 3 月 20 日.
- [23] 加田渉, 関根卓洋, 酒井真理, Raj Kumar Parajuli, 江夏昌志, 山田尚人, 山縣諒平, 石井保行, 佐藤隆博, 三浦健太, 花泉修, イオンマイクロビームをプローブとした荷電粒子誘起発光分析, 第 31 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会, 東京, 2018 年 7 月 13 日.
- [24] 樋口泰成, 須田義規, 春山盛善, 小野田忍, 加田渉, 三浦健太, 大島武, 花泉修, 集束イオンビーム照射によるダイヤモンド中の蛍光中心の形成, 第 31 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会, 東京, 2018 年 7 月 13 日.
- [25] 横澤茂行, 粕谷建太, 王西申, 栗原諒, 高橋龍平, 三浦聡, 加田渉, 三浦健太, 石井保行, 佐藤隆博, 花泉修, Proton Beam Writing 技術を用いたマッハツェンダー型光導波路の作製と評価, 第 31 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会, 東京, P-8, 2018 年 7 月 13 日.
- [26] Wataru Kada, Takahiro Satoh, Ivan Sudić, Natko Skukan, Kenta Miura, Masashi Koka, Naoto Yamada, Yasuyuki Ishii, Milko Jakšić, and Osamu Hanaizumi, Ion beam induced luminescence analysis and imaging system utilizing focused ion microbeam for in-situ diagnostics of radiation induced changes during irradiation, 第 19 回「イオンビームによる表面・界面解析」特別研究会, 京都, 2018 年 12 月 7 日. (招待講演)

## 参考文献

- (1) 北村圭司, PET の原理と画像再構成, Medical Imaging Technology, 28 (2010) 381-383.
- (2) 澁谷憲悟, 陽電子放射断層撮影(PET)装置とその検出器, 陽電子科学, 1 (2013) 13-25.
- (3) M. Kronberger, E. Auffray, and P.R. Lecoq, Improving light extraction from heavy inorganic scintillators by photonic crystals, IEEE Transactions on Nuclear Science, 57 (2010) 2475-2482.
- (4) K. Orita, S. Tamura, T. Takizawa, T. Ueda, M. Yuri, S. Takigawa, and D. Ueda, High-extraction-efficiency blue light-emitting diode using extended-pitch photonic crystal, Japanese Journal of Applied Physics, 43 (2004) 5809-5813.
- (5) 菊田久雄, 表面微細構造による光学機能の発現と応用技術, 精密工学会誌, 74 (2008) 781-784.
- (6) J. Zhang, L. Cong, H. Wan, and T. Wang, Green-emission and n-type conductivity of ZnO:Zn films obtained using vapor deposition method, Applied Surface Science, 255 (2009) 3530-3533.
- (7) J.H. Cai, G. Ni, G. He, and Z.Y. Wu, Red luminescence in ZnO films prepared by a glycol-based Pechini method, Physics Letters A, 372 (2008) 4104-4108.
- (8) J.H. Kim, J.H. Lee, S.W. Kim, Y.Z. Yoo, and T.Y. Seong, Highly flexible ZnO/Ag/ZnO conducting electrode for organic photonic devices, Ceramics International, 41 (2015) 7146-7150.